

MODELAGEM DINÂMICA DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO PARA AMÉRICA DO SUL EMPREGANDO PREVISÃO NUMÉRICA DE TEMPO

Luiz Fernando Sapucci¹
Luiz Augusto Toledo Machado²
João Francisco Galera Monico³

¹ Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Presidente Prudente – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas – sapucci@pos.prudente.unesp.br.

² Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE – Divisão de Satélites e Sistemas Atmosféricos – machado@cptec.inpe.br.

³ Universidade Estadual Paulista – UNESP – Campus de Presidente Prudente – Departamento de Cartografia – galera@prudente.unesp.br.

RESUMO

O Atraso Zenital Troposférico (ZTD - Zenithal Tropospheric Delay) é resultante da diminuição da velocidade de propagação dos sinais de radiofrequência devido à influência dos elementos que compõem as camadas mais baixas da atmosfera terrestre. Ele é minimizado com o emprego de modelos desenvolvidos empiricamente a partir de observações atmosféricas. No entanto, para algumas aplicações em tempo real, como navegação e Geodésia, tais modelos são inapropriados, pois são incapazes de fornecer a qualidade exigida por essas aplicações. Com a implantação em 2010 do novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo, denominado CNS-ATM (*Communication Navigation System-Air Traffic Management*), sistemas como o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) desempenharão um papel importante na navegação aérea, pois permitirão obter boa precisão em tempo real. Para isso, o desenvolvimento de uma modelagem troposférica apropriada a essas aplicações faz-se necessário. O presente trabalho apresenta uma modelagem alternativa do ZTD sobre regiões da América do Sul para as aplicações que necessitam boa modelagem da troposfera. Essa modelagem envolve previsões dos valores do ZTD a partir de modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT). Os resultados obtidos em uma avaliação da qualidade das previsões do ZTD mostraram que em alguns locais é bastante satisfatória, enquanto em outros há a presença de efeitos sistemáticos que poderão ser corrigidos. Atualmente, as previsões do ZTD estão sendo geradas operacionalmente e disponibilizadas na página do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) (<http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>).

Palavras-chave: Atraso Zenital Troposférico, Previsão Numérica de Tempo, CPTEC.

DYNAMIC MODELLING OF THE ZENITHAL TROPOSPHERIC DELAY TO SOUTH AMERICA USING NUMERICAL WEATHER PREDICTION

ABSTRACT

The Zenithal Tropospheric Delay (ZTD) is the decrease of the speed of propagation of the radio frequency signals due to the influence of the elements that compose the low layers of the terrestrial atmosphere. This delay is minimized by applying models developed empirically from atmospheric observations. However, they aren't appropriated for real time applications requiring good level of precision, such as in navigation and Geodesy. A new navigation and administration system of the air traffic, denominated CNS-ATM (Communication Navigation System-Air Traffic Management) will be implanted in 2010 and GNSS (Global Navigation Satellite System) will play an important role in this system, because it allows to obtain precise coordinates in real time. The development of a tropospheric model appropriate for those applications is necessary. This paper presents an alternative ZTD modeling for South America regions appropriated for all applications that request quality in the troposphere modeling. The model provides ZTD values forecasts from Numerical Weather Prediction (NWP) model. The quality of the obtained results in an evaluation of the forecasted ZTD showed that in some places the quality is satisfactory while in others there are systematic effects, which may be removed. Nowadays, the ZTD forecasts are ready for using and it is available in the CPTEC home page (<http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>).

Keywords: *Zenithal Tropospheric Delay, Numerical Weather Prediction, CPTEC.*

1. INTRODUÇÃO

Dentre os vários fatores que afetam os métodos de posicionamento geodésico utilizando satélites artificiais estão os causados pela atmosfera terrestre. Com relação a esses efeitos, a atmosfera é dividida em Ionosfera e camada eletricamente neutra. A Ionosfera é a camada da atmosfera que abrange a região entre 50 km até 1000 km acima da superfície da Terra. Ela causa uma refração dos sinais de radiofrequência, gerando variações em sua velocidade, que é proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) nela presente (CAMARGO, 1999). Como é um meio dispersivo, sua influência é dependente da frequência do sinal, o que permite que combinações entre sinais de diferentes frequências minimizem os erros gerados por essa influência.

A atmosfera eletricamente neutra é a camada entre a superfície da Terra e a Ionosfera, com altura de 50km. Nela está incluída a Troposfera, Tropopausa, Estratosfera e parte da Estratopausa. As diferenças nas concentrações dos gases presente nessa camada também geram nos sinais um atraso, denominado atraso zenital troposférico (ZTD – *Zenithal Tropospheric Delay*), que apesar de menos intenso do que os gerados pela Ionosfera, deve ser também considerado. Como a maior concentração dos gases esta na Troposfera, tais efeitos são comumente denominados pelos geodestas de troposféricos.

Ao contrário do que ocorre na Ionosfera, para frequências menores que 30 GHz o atraso troposférico independe da frequência do sinal, e por esse motivo são empregados modelos troposféricos para minimizar seus efeitos sobre os sinais de radiofrequência (SPILKER, 1994). Tais modelos foram desenvolvidos empiricamente e os resultados são obtidos em função de valores de temperatura pressão e umidade medidos à superfície ou a partir de uma atmosfera padrão (SAPUCCI & MONICO, 2001). Para as aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites que utilizam curto intervalo de tempo de coleta de dados e não requerem alta precisão, tais modelos são suficientes. Normalmente são soluções que utilizam a pseudodistancia. No entanto, eles são inapropriados para as aplicações em tempo real que requerem relativa precisão, pois tais modelos são ineficientes na modelagem das variações do atraso zenital troposférico. Com a implantação em 2010 do novo sistema de navegação e gerenciamento do tráfego aéreo, denominado CNS-ATM (*Communication Navigation System-Air Traffic Management*), o uso de sistemas de determinação e distribuição de correções dos erros presentes nas observáveis dos sistemas de posicionamento por satélite serão mais frequentes, visando boa precisão em tempo real. Um exemplo desses sistemas é o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que visa integrar os principais sistemas de posicionamento por satélite. Para o bom desempenho desse sistema uma modelagem adequada dos efeitos da troposfera é requerida em todo o globo terrestre.

O presente trabalho apresenta uma modelagem da troposfera apropriada para aplicações em tempo real e outras aplicações que utilizam sinais de radiofrequência em regiões da América do Sul e necessitem reduzir os resíduos nas observações finais. Essa modelagem envolve previsões dos valores do Atraso Zenital Troposférico geradas por modelos de Previsão Numérica de Tempo (PNT) (KINTER et al, 1997). Como os modelos de PNT estão baseados nas leis que governam o movimento dos fluidos na atmosfera e as forças atuantes sobre os mesmos, o tratamento da influência da atmosfera eletricamente neutra sobre a propagação dos sinais de radiofrequência que os emprega, pode ser denominado de modelagem Dinâmica do Atraso Zenital Troposférico. As previsões dos valores do ZTD apresentados nesse trabalho são resultados de uma implementação realizada a partir de uma parceria entre a Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) vinculado ao Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) localizado em Cachoeira Paulista SP e a Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP de Presidente Prudente SP, e envolve o modelo Global de PNT que roda operacionalmente no CPTEC.

O objetivo desse trabalho é apresentar uma modelagem alternativa do Atraso Zenital Troposférico sobre regiões da América do Sul para as aplicações dos sistemas de posicionamento por satélites, como o GPS, GLONASS, entre outros, que necessitam boa precisão em tempo real, assim como outras atividades espaciais que empregam sinais de radiofrequência, como por exemplo, na determinação de órbitas de satélites em geral. Esse tipo de modelagem troposférica já tem sido explorado atualmente em outras regiões do globo (JENSEN, 2003; JUPP et al., 2003; SCHULER et al., 2003). Para destacar a complexidade envolvida nessa modelagem dinâmica dos valores do ZTD, detalhes do modelo de Circulação Geral Atmosférico em uso no CPTEC são apresentados.

2. MODELO DE CIRCULAÇÃO GERAL ATMOSFÉRICO DO CPTEC

O modelo de circulação geral atmosférico (MCGA) em uso no CPTEC tem sua origem naquele usado para previsão de tempo de médio prazo pelo *National Centers for Environmental Prediction*

(NCEP) (CPTEC, 2004). Operacionalmente a previsão numérica de tempo global, iniciou-se no CPTEC em 1994, tendo implementado uma versão desse modelo modificada pelo *Center for Ocean, Land and Atmosphere Studies* (COLA) com adaptações as necessidades operacionais do CPTEC, denominada CPTEC/COLA. Tal modelo é rodado com as resoluções T62L28 e T126L28, onde L se refere ao número de camadas na vertical e T refere-se às resoluções horizontais, onde T62 e T126 equivalem, respectivamente, a uma resolução aproximada de 200x200 Km e 100x100 Km próximo à linha do Equador. Ele é rodado para previsão de sete dias nos horários 00 e 12 UTC, para ambas as resoluções.

O tratamento dinâmico da atmosfera é realizado a partir das leis físicas básicas que governam os movimentos atmosféricos utilizadas pelo modelo de circulação geral atmosférico, como as leis de conservação de massa e de umidade, de energia e de momentum angular (KINTER *et al*, 1997). O conjunto completo das equações envolvidas é chamado de equações primitivas e é composto pelas equações da continuidade de massa para o ar seco e vapor d'água, a primeira lei da termodinâmica, as equações do movimento (segunda lei de Newton) e equação do balanço hidrostático para a componente vertical da velocidade do vento. O modelo é global em extensão, e é baseado em uma geometria esférica, cujo raio é igual ao raio médio da Terra, e a distância entre a superfície física e essa superfície é incluída na modelagem como variável independente. As variáveis prognósticas desse modelo são: a pressão à superfície, a componente vertical do rotacional do vento, a divergência do vento horizontal, a temperatura virtual, a umidade específica, temperatura de superfície, umidade e temperatura do solo, entre outras menos relevantes.

As equações do modelo são resolvidas por meios numéricos sendo discretizadas em quatro dimensões. O tempo é dividido em passos com espaçamentos regulares fixos e a diferenciação é feita por um método semi-implícito envolvendo as equações da continuidade, da divergência e da termodinâmica. Enquanto que, as equações da conservação de umidade específica são tratadas explicitamente. As variações espaciais nas duas dimensões horizontais são representadas por coeficientes de projeção sobre uma base de funções que formam um conjunto ortonormal completo. Tais funções são particularmente adequadas para movimentos de fluídos com geometria esférica: os harmônicos esféricos (série de Fourier na direção oeste-leste e de Funções Associadas de Legendre sul-norte). O espaçamento vertical é irregular, pois é necessária uma resolução maior próximo à superfície, devido à transferência de fluxos de energia entre solo e ar. Nessa modelagem são consideradas também: o tipo de vegetação, a evaporação e os fluxos de calor sensível da superfície dos oceanos para a atmosfera, o aquecimento da atmosfera devido à absorção de radiação solar em função do ângulo de incidência dos raios solares, da presença de nuvens na atmosfera e da concentração de ozônio, vapor d'água e outras espécies radiativamente ativas menos importantes.

Como resultado dessa modelagem nas saídas do processamento desse modelo são gerados campos das principais quantidades meteorológicas em todos os pontos do grid, e em todos níveis considerados pelo modelo. A partir dos valores de tais quantidades, pode se obter as previsões do ZTD.

3. VALORES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO OBTIDOS A PARTIR DE MODELOS DE PNT

Os sinais de radiofrequência ao se propagarem na atmosfera, além de outros fatores, sofrem a influência dos gases que compõem a atmosfera, causando mudanças na direção e diminuição na velocidade das ondas eletromagnéticas. Esse efeito é acentuado na troposfera, pois é a camada mais superficial da atmosfera onde é maior a concentração desses gases. Esse efeito faz com que o caminho efetivamente percorrido seja diferente da distância geométrica entre o satélite e o receptor. A diferença entre o comprimento da trajetória efetivamente percorrida pelo sinal (S) e o comprimento da trajetória geométrica (S_g) é denominado atraso troposférico (D_{TROP}) na direção satélite receptor e é dado por:

$$D_{TROP} = S - S_g = 10^{-6} \int N ds . \quad (1)$$

onde N é a refratividade do ar.

Para facilitar a modelagem das variações da refratividade, e por consequência o atraso troposférico, são empregadas as funções de mapeamento (DAVIS, *et al.*, 1985; NIEL, 1996; entre outros). Por intermédio delas, as variações da refratividade em uma direção qualquer podem ser tratadas na direção zenital, considerando apenas a concentração dos gases na coluna vertical atmosférica. Desta forma, a refratividade atmosférica pode ser considerada como uma função da temperatura (T), da densidade do ar (ρ) e da pressão parcial do vapor d'água (e), com valores variando em função da altitude (h). Assim tem-se (SPILKER *et al.*, 1994):

$$ZTD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_h \rho dh + 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh, \quad (2)$$

onde ZTD é o atraso zenital troposférico, R_h é a constante específica para os gases hidrostáticos, Z_w é a constante de compressibilidade do vapor d'água, k_1 , k_2' e k_3 são constantes da refratividade atmosférica, cujo os valores foram determinados experimentalmente (BEVIS et al., 1994).

Devido ao tipo de comportamento dos gases que compõem a troposfera, o atraso zenital troposférico (ZTD) é dividido em duas componentes: úmida (*Zenithal Wet Delay* - ZWD), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática (*Zenithal Hydrostatic Delay* - ZHD), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. A componente hidrostática é modelada pela primeira parcela da equação (2), enquanto que a componente úmida é modelada pela segunda parcela dessa equação. Nota-se que, o atraso zenital troposférico da componente hidrostática depende apenas da densidade do ar atmosférico. Por isso, seus valores podem ser determinados a partir de medidas de pressão à superfície (P_0), da latitude do local (φ), e da altitude (h_0) em quilômetros. A expressão para a determinação do ZHD é dada pela equação (DAVIS et al., 1985):

$$ZHD = (2,27683157 \times 10^{-3}) \frac{P_0}{(1 - 0,0026 \cos 2\varphi - 0,00028 h_0)}. \quad (3)$$

A precisão dos valores de ZHD fornecidos pela equação (3) depende da qualidade das medidas de pressão atmosférica. Para barômetros com precisão de 0,3 hPa a precisão dos resultados obtidos pela equação (3) é de 1 mm.

Quanto ao atraso zenital úmido, os dois últimos termos da equação 2 que aqui são reescritos:

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} \left(k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1} \right) dh, \quad (4)$$

está totalmente relacionado com a razão de mistura entre o vapor d'água e os gases hidrostáticos, o que torna difícil sua determinação a partir de medidas à superfície. Apesar de gerar uma influência menor do que a componente hidrostática, representando cerca de 10% do atraso zenital troposférico, sua variação temporal e espacial é muito maior, chegando a 20% em poucas horas.

Aplicando os valores das previsões das variáveis: temperatura e temperatura do ponto de orvalho nos diferentes níveis dos perfis verticais gerados pelo modelo de PNT na equação (4), realizando uma integração numérica, é possível determinar valores do atraso zenital troposférico úmido nos mesmos intervalos de tempo em que o modelo numérico gera as previsões. De forma similar, aplicando os valores de pressão atmosférica à superfície, previstos pelo modelo, na equação (3) pode-se obter o atraso zenital da componente hidrostática. Somando os valores do atraso zenital hidrostático com o úmido obtêm-se o atraso zenital troposférico (ZTD). Fazendo isso para todos os pontos do *grid* do modelo obtêm-se uma malha de informação, que por interpolação é possível obter tais valores para qualquer ponto recoberto pelo mesmo.

4. PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO PARA A AMÉRICA DO SUL

Na figura 1 são apresentados os valores do atraso zenital troposféricos através de um esquema de cores para facilitar a visualização das variações do ZTD sobre regiões da América do Sul. Nessa figura são apresentados os valores do ZTD gerados pelo modelo global de PNT na resolução T126L28 para a análise da rodada do dia 22/02/2004 das 12:00 UTC. A escolha desse dia foi devido a forte presença de uma massa de ar frio no Sul do Brasil. A figura 2 apresenta os valores da componente hidrostática do atraso zenital troposférico e, de forma similar, à figura 3 apresenta os valores da componente úmida desse atraso para o mesmo dia em que se referem os valores da figura 1. Como a variação temporal da componente hidrostática é pequena, na figura 2 são apresentados os resultados de apenas duas épocas de previsão, a análise e +6 horas. Por outro lado a variação da componente úmida é muito grande e por esse motivo a figura 3 apresenta varias épocas de previsão para destacar essa variação e a importância de uma adequada modelagem dessa variável. Na figura 3 são apresentados os valores da análise, +6, +12 e +18 horas após a análise.

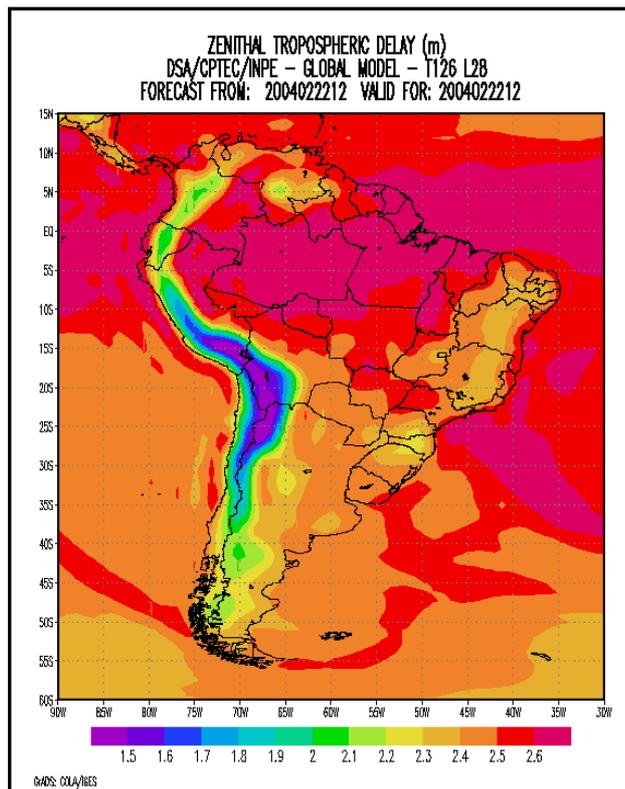


Figura 1 –Esquema de cores contendo as previsões do atraso zenital troposférico para a América do Sul.

Os valores apresentados na figura 1 são iguais a soma dos valores apresentados na figura 2a e 3a e por isso todas as variações consideradas em ambas as componentes estão presentes no atraso zenital troposférico. Na figura 2 nota-se que além da pequena variação temporal da componente hidrostática há também uma pequena variação espacial. As variações dessa componente estão muito correlacionadas com as variações da pressão atmosférica, a qual com relação ao tempo são influenciadas pelas passagens das massas de ar frio vindas da Antártida, enquanto que com relação à posição geográfica é influenciada pela altitude da superfície física da terra. Por tais motivos pode-se notar valores bastante baixo do ZHD sobre a cordilheira dos Andes e valores não tão expressivos sobre regiões serranas, como por exemplo, o sul do Estado de Minas Gerais.

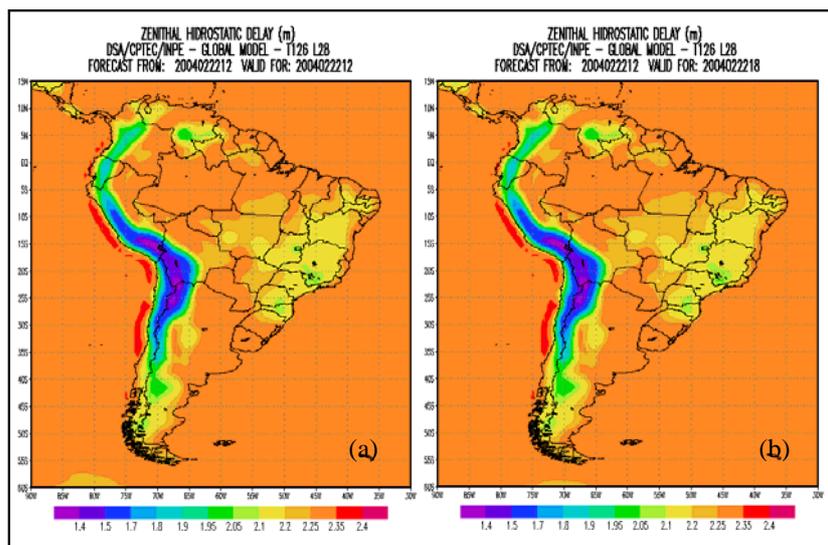


Figura 2 – Esquema de cores contendo as previsões do atraso zenital hidrostático para a América do Sul.

Nos esquemas de cores da figura 3 pode-se facilmente comprovar a grande variabilidade temporal e espacial da componente úmida do atraso zenital troposférico, pois ela está relacionada com os perfis de temperatura e umidade e há diversos fatores que influenciam tais quantidades os quais podem ser

observados nessa figura. Um desses fatores são as grandes altitudes da superfície da Terra, onde a baixa concentração de vapor está associada com as baixas temperaturas predominante nessas regiões. Isso é o que ocorre sobre a região dos Andes onde os valores do ZWD são praticamente nulos constantemente. Um outro fator é a passagem de sistemas de ar frio provindos da Antártida que geram quedas da temperatura e aumento da pressão atmosférica ocasionando diminuição da concentração de vapor d'água atmosférico devido à ocorrência de precipitação e a diminuição da evapotranspiração sobre a superfície terrestre. Nos esquemas presentes na figura 3 pode-se notar a influência da passagem de uma massa de ar frio nos valores do ZWD sobre a Argentina e outros países localizados ao sul do continente até a região Sul do Brasil. Um terceiro fator é a alta temperatura e a grande superfície coberta por floresta na região Amazônica, os quais geram uma grande concentração de vapor d'água, e por consequência valores do ZTD bastante elevados sobre essa região. Isso também pode ser facilmente observado na figura 3. Um último fator que se destaca na figura 3 é a região do semi-árido que compreende a região central do Nordeste do Brasil. Nessa região a concentração de vapor é pequena, o que gera valores baixos do ZWD.

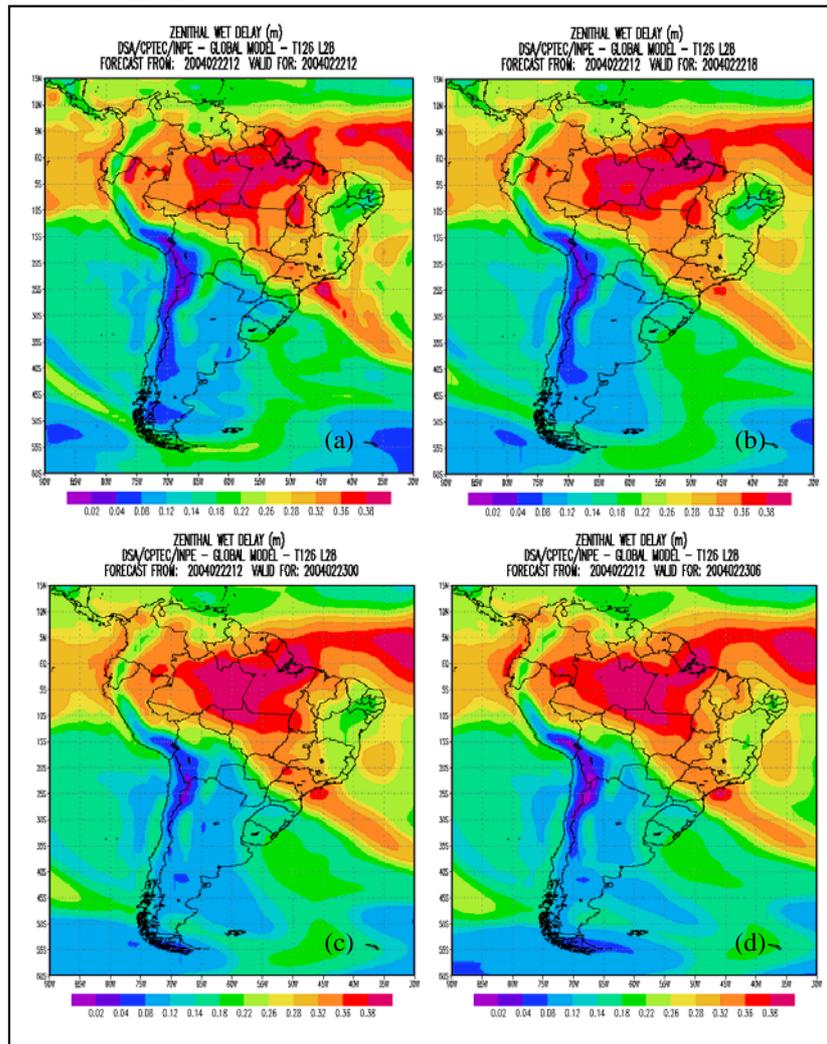


Figura 3 – Esquema de cores contendo previsões do atraso zenital troposférico da componente úmida para a América do Sul.

Atualmente, previsões do ZTD estão sendo geradas operacionalmente pelo DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do CPTEC/INPE) e estão sendo disponibilizadas via Internet no seguinte endereço <http://satellite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>. Nessa página é possível visualizar a dinâmica dos fatores que influenciam as variações do ZTD através de animações, assim como obter os valores numéricos das previsões do ZTD a serem aplicados no processamento de dados GPS. Os valores apresentados nessa página são atualizados duas vezes ao dia. A primeira atualização é realizada entre 7:30 e 8:30 (horário de Brasília), a qual se refere às saídas do modelo das 00:00UTC. A segunda atualização é feita entre 19:30 e 20:30 e essa se refere às saídas das 12:00UTC do modelo numérico do CPTEC. Devido a tais horários de atualização a latência entre a disponibilidade das previsões e a hora que se referem é de 10,5 ou 11,5 horas. Dessa forma as saídas: +12, +18 e + 24 serão as mais apropriadas entre as disponíveis, pois a anterior a essas estará atrasada e as posteriores

já poderão ser substituídas pelos resultados provenientes da próxima rodada do modelo. Apesar dos valores das variáveis prognósticas serem preditos até 7 dias após a sua inicialização, os valores apresentados nessa página utilizam somente as previsões até 66 horas.

5. ANÁLISE DE QUALIDADE DAS PREVISÕES DO ATRASO ZENITAL TROPOSFÉRICO

A qualidade das previsões do atraso zenital troposférico foi avaliada ao ser comparada com os valores obtidos pelo pós-processamento dos dados GPS coletados por 10 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sinais GPS) (Fortes, 1996) no período de fevereiro e março de 2004. As estações utilizadas são: Bom Jesus da Lapa-BA (BOMJ), Brasília-DF (BRAZ), Fortaleza-CE (FORT), Imperatriz-MA (IMPZ), Curitiba-PR (PARA), Porto Alegre-RS (POAL), Salvador-BA (SALV), Presidente Prudente-SP (UEPP), Viçosa-MG (VICO) e Crato-CE (CRAT). As estimativas do ZTD obtidas via GPS foram escolhidas para realização dessa avaliação devido a grande disponibilidade dessa informação e pelos bons resultados obtidos por essa técnica ao comparar com as radiossondas (SAPUCCI et al, 2003).

Para a determinação do atraso zenital troposférico, os dados GPS foram processados pelo *software* GOA II (GREGORIUS, 1996), utilizando o método de posicionamento por ponto de alta precisão (MONICO, 2000), com intervalo de processamento de 30 segundos e ângulo de elevação mínimo do satélite de 10°. A função de mapeamento utilizada foi a de Niell (NIELL, 1996).

Tabela 1 – Valores dos indicadores de qualidade das previsões do ZTD obtidos pela comparação com as estimativas GPS.

Estações da RBMC	Indicadores de qualidade	Saídas do Modelo de PNT							
		Análise	+6	+12	+18	+24	+30	+36	+42
BOMJ	N. de casos	79	92	92	92	92	92	92	92
	e_m (m)	-0,044	-0,046	-0,045	-0,045	-0,044	-0,045	-0,046	-0,047
	RMS (m)	0,050	0,053	0,053	0,055	0,056	0,062	0,063	0,067
BRAZ	N. de casos	83	96	96	96	96	96	96	96
	e_m (m)	0,072	0,079	0,081	0,082	0,087	0,084	0,088	0,084
	RMS (m)	0,074	0,082	0,084	0,085	0,091	0,088	0,093	0,090
FORT	N. de casos	68	76	76	76	76	76	76	76
	e_m (m)	-0,011	-0,016	-0,015	-0,020	-0,012	-0,016	-0,012	-0,024
	RMS (m)	0,024	0,030	0,033	0,042	0,042	0,047	0,049	0,057
IMPZ	N. de casos	50	50	50	50	50	51	51	51
	e_m (m)	-0,009	-0,010	-0,015	-0,018	-0,019	-0,020	-0,014	-0,014
	RMS (m)	0,023	0,022	0,027	0,031	0,033	0,032	0,029	0,030
PARA	N. de casos	78	88	88	88	88	88	88	88
	e_m (m)	0,099	0,093	0,096	0,096	0,099	0,097	0,099	0,099
	RMS (m)	0,101	0,095	0,100	0,101	0,106	0,106	0,110	0,111
POAL	N. de casos	84	93	93	93	93	93	93	93
	e_m (m)	-0,016	-0,021	-0,023	-0,024	-0,022	-0,024	-0,021	-0,022
	RMS (m)	0,024	0,032	0,043	0,050	0,057	0,060	0,065	0,068
SALV	N. de casos	85	98	98	98	98	98	98	98
	e_m (m)	0,009	0,006	0,004	0,004	0,007	0,006	0,008	0,004
	RMS (m)	0,024	0,028	0,029	0,026	0,030	0,034	0,037	0,038
UEPP	N. de casos	55	68	68	68	68	67	67	67
	e_m (m)	0,045	0,043	0,043	0,042	0,041	0,035	0,031	0,029
	RMS (m)	0,049	0,047	0,048	0,049	0,049	0,047	0,047	0,048
VICO	N. de casos	79	89	89	89	89	89	89	89
	e_m (m)	-0,004	-0,006	-0,002	-0,001	0,007	0,001	0,007	0,001
	RMS (m)	0,019	0,022	0,028	0,029	0,033	0,038	0,043	0,043
CRAT	N. de casos	72	84	84	84	84	84	84	84
	e_m (m)	-0,014	-0,023	-0,013	-0,012	0,003	0,000	0,004	-0,006
	RMS (m)	0,028	0,040	0,032	0,036	0,035	0,039	0,042	0,047

Os valores apresentados na tabela 1 indicam que a qualidade das previsões apresenta uma leve redução quanto maior o tempo entre a época a que elas se referem e a época inicial do modelo. Isso é de se esperar devido ao aumento das incertezas do modelo de PNT. Um outro ponto destacado pelos valores apresentados no tabela 1 é a grande oscilação dos valores do RMS entre as 10 estações avaliadas. A partir dos valores apresentados nessa tabela para as saídas até +24 é possível agrupar as estações em três grupos. O primeiro grupo são os locais onde o RMS resultante ficou abaixo de 4 cm, no qual estão presentes as estações FORT, IMPZ, SALV, VICO e CRAT. Em alguns desses locais o RMS na análise ficou abaixo da própria incerteza das estimativas GPS, como é o caso da estação VICO. O segundo grupo são os locais onde o RMS ficou entre 4 e 6 cm, como é o caso de BOMJ, POAL e UEPP.

E o terceiro grupo é composto pelos locais onde os valores do RMS foram maiores do que 6 cm, como é o caso de BRAZ e PARA.

Os valores do erro médio indicam que nos locais pertencentes ao primeiro grupo, onde a dispersão é pequena, a tendência também é pequena, sendo praticamente nula na estação VICO e SALV. Nos locais pertencentes ao segundo e ao terceiro grupo os valores do erro médio indicam que os resultados obtidos pelo modelo tendem a gerar valores maiores do que as estimativas GPS, com exceção dos resultados obtidos em POAL e BOMJ, onde a tendência é contrária e menor.

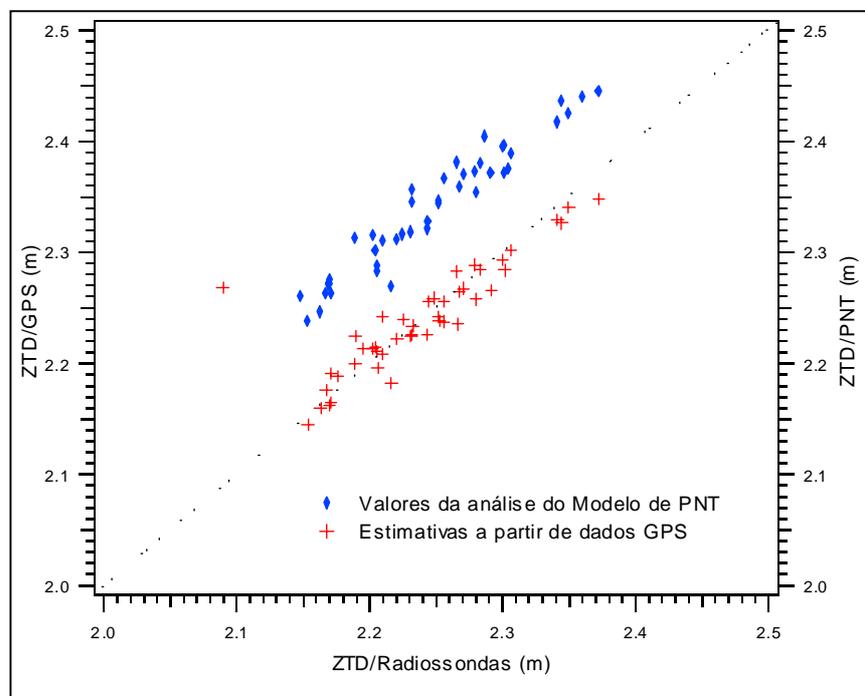


Figura 4 – Comparação dos valores do ZTD obtidos a partir de diferentes técnicas na estação PARA.

Como os resultados gerados na estação PARA foram muito maiores que os obtidos nos demais locais suspeitou-se da qualidade das estimativas do ZTD obtidas pelo processamento dos dados GPS. Por esse motivo tanto as previsões pelo modelo como as estimativas GPS foram comparadas com valores obtidos pelo emprego de radiossondas lançadas em Curitiba. Os resultados dessa comparação são apresentados na figura 4. Os resultados indicam que os valores obtidos via GPS estão compatíveis com os gerados a partir das radiossondas e ficou clara a presença de um efeito sistemático nos valores preditos pelo modelo. Com relação aos valores obtidos pelas radiossondas o erro médio das estimativas GPS foi de apenas 2 mm enquanto que para as previsões do modelo o erro médio foi de 9,2 cm. O valor do RMS das estimativas GPS e das previsões do modelo, com relação aos valores gerados pelas radiossondas, é de 1,6 cm e 9,4 cm, respectivamente. A dispersão em torno da média com relação aos valores gerados pelas radiossondas, tanto as estimativas como as previsões o valor do desvio padrão é de 1,5 cm, o que reforça a suspeita da presença de um efeito sistemático nos resultados apresentados pelo modelo de PNT nessa estação.

6. VANTAGENS E DESVANTAGENS NA UTILIZAÇÃO DAS PREVISÕES DO ZTD

Com relação as demais opções disponíveis para a modelagem dos efeitos da troposfera sobre a propagação dos sinais de radiofrequência a modelagem dinâmica apresenta algumas vantagens assim como também desvantagens

Como vantagens pode-se destacar os seguintes tópicos:

- Com o emprego do modelo de PNT a modelagem resultante considera todas as variações temporais e espaciais do ZTD empregando operacionalmente um complexo processo dinâmico de coleta, processamento e de distribuição de informações;
- Disponibilidade em todas as regiões da América do Sul e oceanos adjacentes;
- Valores do ZTD de boa qualidade em tempo real sem precisar medir valores de quantidades meteorológicas durante a coleta dos dados GPS;
- Modelagem sensível às variações diárias e sazonais dos fatores que influenciam no atraso zenital troposférico;

- Os valores obtidos não são contaminados com os erros provenientes da relação entre os valores medidos à superfície com os do perfil atmosférico como é freqüente nos modelos de ZTD convencionais;
- Nenhum custo adicional para o usuário final, apesar de estarem envolvidos nesse processo grandes investimentos, por parte do governo brasileiro, em qualificação pessoal, infra-estrutura e tecnologia de ponta disponíveis no DSA/CPTEC/INPE.

Por outro lado, no emprego dessa modelagem deve ser levado em consideração algumas desvantagens:

- A principal delas, a qual é um fator limitante, é a necessidade de um link à Internet para a obtenção das previsões do ZTD, mesmo que seja apenas uma vez ao dia;
- Como os valores das previsões são disponíveis em intervalos de tempo de 6 horas, essa modelagem não é sensível às pequenas flutuações dos fatores que influenciam os valores do ZTD;
- A necessidade de softwares com códigos abertos ou que permitam a introdução de informações adicionais no processamento de dados GPS como os valores do ZTD.

Com o aumento dos usuários desse tipo de modelagem troposférica as vantagens tendem a aumentarem e as desvantagens poderão ser minimizadas, pois a demanda por melhores resultados pode justificar métodos mais eficientes na geração e disponibilidade das previsões do ZTD.

7. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

É consenso que a latência da disponibilidade das saídas do modelo de PNT do CPTEC, que atualmente é de 11 horas em média, é muito maior do que poderia ser considerado ideal. Esforços para minimizar essa latência estão sendo realizados pelos responsáveis por esse produto. Resultados positivos nesse sentido poderão trazer benefícios para a qualidade dos valores do ZTD disponíveis, pois previsões mais próximas da condição inicial do modelo poderiam ser utilizadas, as quais, como já discutido anteriormente, são de melhor qualidade.

Sabe-se que a baixa precisão e a falta de continuidade das informações do vapor d'água atmosférico são algumas das maiores fontes de erros na previsão da precipitação pluviométrica gerada pelos modelos de PNT (KUO et al., 1993). Esse é o motivo pelo qual tem sido bastante freqüente a assimilação dos valores do IWV (*Integrated Water Vapor*) obtidos a partir do pós-processamento dos dados GPS coletados por estações terrestres nos modelos de PNT (KUO et al., 1993, 1996; CUCURULL et al., 2001; MAREL, 2001). Nesse sentido, a RBMC poderá contribuir com o modelo de PNT do CPTEC, pois apesar de não ter a densidade de estações ideal para esse fim, o Brasil possui uma base de dados meteorológica bastante precária, principalmente com relação às informações do vapor d'água atmosférico. Os primeiros testes de assimilação dos valores do IWV obtidos a partir dos dados GPS coletados pela RBMC estão sendo realizados no CPTEC em conjunto com a FCT-UNESP. Pretende-se verificar o impacto que essa assimilação pode gerar nas previsões atmosféricas assim como na previsão o atraso zenital troposférico. O objetivo é que efeitos sistemáticos como os encontrados na estação PARA possam ser eliminados e que os danos causados nas previsões geradas pelo modelo sejam minimizados.

Os resultados obtidos na avaliação da qualidade das previsões do ZTD mostraram que em algumas estações onde foram realizadas essas avaliações os resultados foram satisfatórios, enquanto que em outras foram encontrados efeitos sistemáticos que merecem uma melhor investigação para identificar as causas. Esses resultados dão a indicação da necessidade de se realizar outras avaliações abrangendo um maior número de locais e considerando um período maior, contemplando todas as estações sazonais do ano. Para isso, pretende-se empregar, além da RBMC, estações de coleta contínua de dados GPS localizadas em outros países da América do Sul, assim como as radiossondas lançadas sistematicamente nessas regiões.

Considerando a complexidade matemática envolvida no modelo de circulação geral atmosférico presente na PNT, a tecnologia computacional empregada, e a qualidade obtida dos valores preditos do ZTD pode-se afirmar que a modelagem dinâmica do atraso zenital troposférico é a mais adequada para as aplicações que requerem boa precisão em tempo real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S.; HERRING, TA.; ANTHES, R.; ROCKEN, C.; WARE RH. **GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays into precipitable water**. J. Appl. Meteor., 33, 379-386, 1994.

CAMARGO, PO. **Modelo Regional da Ionosfera Para Uso em Posicionamento com Receptores de uma Freqüência**. Curitiba. 196p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, 1999.

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto de Pesquisas Espaciais. **Modelo de Circulação Geral Atmosférico do CPTEC**. Endereço eletrônico: http://www.cptec.inpe.br/prevnum/exp_global.shtml (Página visitada em 27/05/2004);

CUCURULL, L.; RIUS, A.; VANDENBERGHE, F.; PONDECA, M. 4D – **VAR assimilation of GPS-derived ZTD: a case study**. Institute of Space Studies of Catalonia (IEEC/CSIC), ION2001, 2001.

DAVIS, JL.; HERRING, TA.; SHAPIRO, I.; ROGERS, AE.; ELGENED, G. **Geodesy by Interferometry: Effects of Atmospheric Modeling Errors on Estimates of Base Line Length**. Radio Sci., vol. 20, 1593-1607, 1985.

FORTES, LPS. **Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)**. Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 152 pp, 1997.

GREGORIUS, T. **How it Works... GIPSY OASIS II**, Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, 1996.

JENSEN, ABO.; TSCHERNING, CC.; MADSEN, F. **Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning**. In: ION GPS 2003 -16th INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING 2003. Portland, Oregon. 2003.

JUPP, SM.; POWE, J.; OWEN, J.; BUTCHER. **Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global Positioning Applications**. Defense Science and Technology Laboratory, UK

KINTER, J.L. *et al* **The COLA Atmosphere-Biosphere General Circulation Model**. Volume1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51. Calverton, USA, 1997.

KUO, YH.; GUO, YR.; WESTWATER, ER. **Assimilation of Precipitable Water Into Mesoscale Numerical Model**. Mon. Wea. Rev., 121, 1215-1238, 1993.

_____, ZUO, X.; GUO, YR. **Variational Assimilation of Precipitable Water Using Nonhydrostatic Mesoscale adjoin Model. Part I: Moisture retrieval and sensitivity experiments**. Mon. Wea. Rev., 124, 122-147, 1996.

MAREL, H. **Exploitation of Ground Based GPS for Numerical Weather Prediction and climate applications in Europe**. Delft University of Technology, Department of Geodesy, Thijsseweg 11, 2629 JA Delft, The Netherlands, 2001.

MONICO, JFG. **Posicionamento Pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, Fundamentos e aplicações**. Editora UNESP, 291 p., 2000.

NIELL, AE. **Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths**. Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No.B2, Pages 3227-3246, 1996.

SAPUCCI, LF; MONICO, JFG. **Avaliação dos modelos de Hopfield e de Saastamoinen para a modelagem do atraso zenital troposférico em território Brasileiro utilizando GPS**. In: Séries em Ciências Geodésicas 30 anos de Pós Graduação em Ciências Geodésicas no Brasil. Curitiba, 2001, v. 1, p. 47-61.

_____, _____, ESPINOSA, ES.; MACHADO, LAT. **Predições do atraso zenital troposférico na América do Sul para posicionamento GNSS em tempo real**. Anais do III COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 2003, Curitiba. III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas. 2003.

SPIPKER, J.; J. JR. **Tropospheric Effects on GPS**. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Vol 1 Capitol 13, pg. 517 – 546, 1994.

TEUNISSEN P. **Integer Ambiguity Solution**, In: Kleusberg A. and Teunissen P. GPS FOR GEODESY, Berlin, 1998.

SCHÜLER, T.; CHÜLER HEIN, TGW.; EISSFELLER, B. **Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS Troposphere**, Global Positioning

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem: Ao Met. Wagner Flauber Araújo pelo apoio técnico na implementação das previsões do ZTD; À Claudia Maria M. R. L. Martins pela implementação da página; Ao Carlos Eduardo Marini Cervellini pelo apoio no processamento dos dados GPS; E à FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado de São Paulo (processo N° 01/12761-9), pelo suporte financeiro.